

# Heißgasentstaubung

Bohnet, Matthias

Veröffentlicht in:  
Jahrbuch 1995 der Braunschweigischen  
Wissenschaftlichen Gesellschaft, S.53-68



Verlag Erich Goltze KG, Göttingen

MATTHIAS BOHNET, Braunschweig

## Heißgasentstaubung

Braunschweig, 10. November 1995\*

### Einführung

Die Auslegung von Staubabscheidern für den Betrieb bei hohen Temperaturen und hohen Drücken ist nach wie vor schwierig. Zur Lösung der Probleme sind drei Fragen zu beantworten:

- Verlässliche Berechnung des Fraktionsabscheidegrades für hohe (zirkulierende Wirbelschicht) und niedrige (Gasturbinenbetrieb) Feststoffbeladungen.
- Die Festigkeit und Standzeit der Filtermaterialien sowie die Möglichkeiten der Entfernung abgeschiedener Feststoffpartikel oder Tropfen vom Filtermittel müssen bekannt sein.
- Der Austrag der Asche, beziehungsweise Flüssigasche, aus dem Abscheider ist zu gewährleisten. Für Temperaturen bis 1100 K ist das Problem gelöst, für Temperaturen über 1100 K, bei denen die Asche klebrig oder flüssig wird, sind noch keine Lösungen für einen zuverlässigen Betrieb von Abscheidern bekannt.

Die Entwicklung neuer Prozesse und verschärfte Umweltforderungen erfordern deshalb neue Überlegungen zur Heißgasentstaubung. Die wichtigste technische Anwendung in diesem Bereich liegt bei fortschrittlichen kohlegefeuerten Kraftwerken. Für den konventionellen Dampfturbinenprozeß werden hauptsächlich drei Arten der Kohleverbrennung eingesetzt:

- Rostfeuerung
- Wirbelschichtverbrennung
- Kohlestaubfeuerung

Bedingt durch die Tatsache, daß die übliche Temperatur im Wasser-Dampf-Kreislauf 820 K beträgt, die Temperatur der Rauchgase jedoch deutlich höher ist, sind erhebliche Energieverluste die Folge. Deshalb bietet sich die Kombination eines Gas- und eines Dampfturbinenprozesses an.

Für den Einsatz kohlegefeuerter Gas- und Dampfturbinenprozesse ist die Konversion der Kohle unter Druck erforderlich. Hierfür stehen mehrere Verfahren zur Verfügung:

- Druckkohlevergasung und Verbrennung des Gases in der Turbinenbrennkammer
- Betrieb der Gasturbine mit dem Rauchgas einer:
  - Druckwirbelschichtverbrennung
  - Druckkohlestaubverbrennung
- Direkte Verbrennung von Kohlestaub in der Turbinenbrennkammer

---

\* Vortrag vor der Plenarversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft

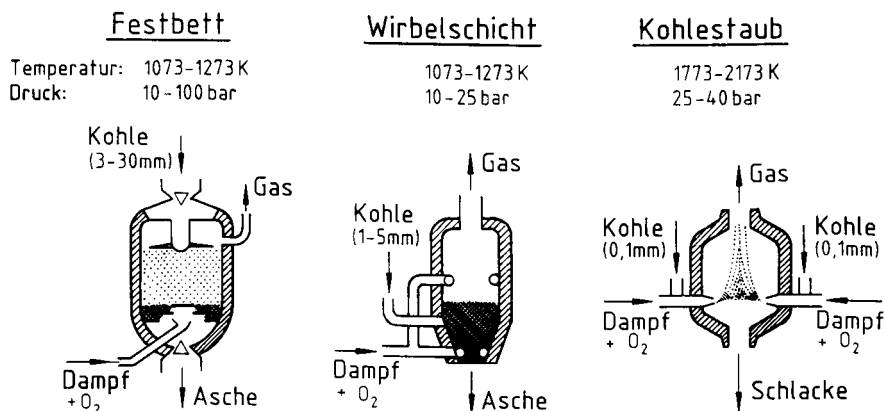


Abb. 1  
Verschiedene Kohlevergasungsreaktoren

Für die Kohlevergasung werden verschiedene Reaktoren eingesetzt, die in Abb. 1 gezeigt sind [1]. Die Kohlevergasung unter Druck führt zu unterschiedlichen Produktgasen mit, wie aus Tab. 1 zu ersehen ist, sehr unterschiedlichen Feststoffbelastungen.

Reaktortyp	Feststoffbelastung [g/Nm <sup>3</sup> ]
Festbett	1–6
Wirbelschicht	8–20
Kohlestaub	50–150

Tab. 1: Feststoffbelastung im Produktgas verschiedener Vergasungsprozesse [1]

Die bei der Druckvergasung, bzw. Druckverbrennung auftretenden Temperaturen und Drücke finden sich in Tab. 2.

	Temperatur K	Druck bar
Druckkohlevergasung	673–1273	10–100
Druckwirbelschichtverbrennung	1173	4–25
Druckkohlestaubverbrennung	1673–1773	4–25

Tab. 2: Temperatur und Druck verschiedener Kohlevergasungs- und Verbrennungsprozesse [2, 3]

Bedingt durch die Tatsache, daß die Druckkohlestaubverbrennung Gastemperaturen zwischen 1700 und 1800 K ergibt, ist dieser Prozeß in der Zukunft besonders interessant. Um dies zu verdeutlichen, sind in Abb. 2 die Nettowirkungsgrade verschiedener Prozesse in Abhängigkeit von der Gastemperatur aufgetragen. Die Druckkohlestaubverbren-

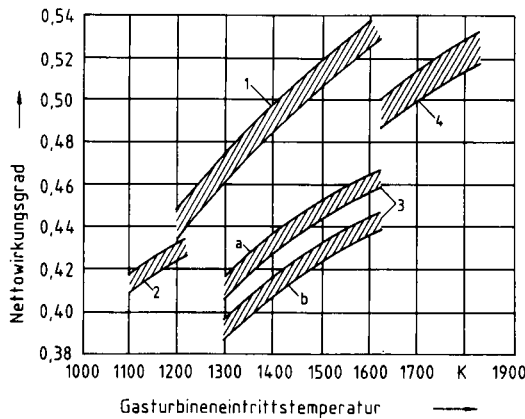


Abb. 2  
Nettowirkungsgrad verschiedener Kraftwerksprozesse

nung erreicht die Wirkungsgrade von erdgasbetriebenen Verfahren, allerdings erst bei erheblich höheren Temperaturen.

### Anforderungen an die Heißgasentstaubung

Zwei Hauptprobleme müssen gelöst werden: Die Entfernung fester und gasförmiger Verunreinigungen aus dem heißen Gas. Diese Forderung resultiert aus der Tatsache, daß die Turbinenhersteller bestimmte Anforderungen an das Gas zum Turbinenbetrieb stellen. Aus dem Gas müssen insbesondere gasförmige Komponenten, wie Natrium, Kalium, Vanadium, Blei, Zinn, Kalzium und Chlor entfernt werden [3]. Darüber hinaus gibt es scharfe Anforderungen bezüglich der Partikelgröße und der Konzentration des Feststoffes, die im Gas verbleiben dürfen. Abb. 3 gibt einen Eindruck von den Anforderungen verschiedener Gasturbinenhersteller. Besonders kritisch ist die Forderung, daß alle Partikel mit Durchmessern über 10 µm abzuschneiden sind.

Für die Partikelabscheidung bei hohen Temperaturen und hohen Drücken sind grundsätzlich vier unterschiedliche Systeme einsetzbar:

- Filter:
  - Gewebe- bzw. Faserfilter
  - keramische Filter
  - Festbett- oder Wirbelschichtfilter
- Elektrofilter
- Zyklonabscheider
- Wäscher

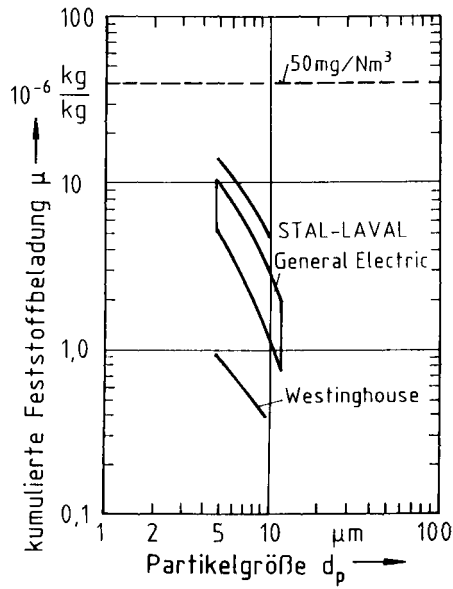


Abb. 3

Zulässige Feststoffbelastung und Partikelgrößen für Gasturbinenbetrieb [5]

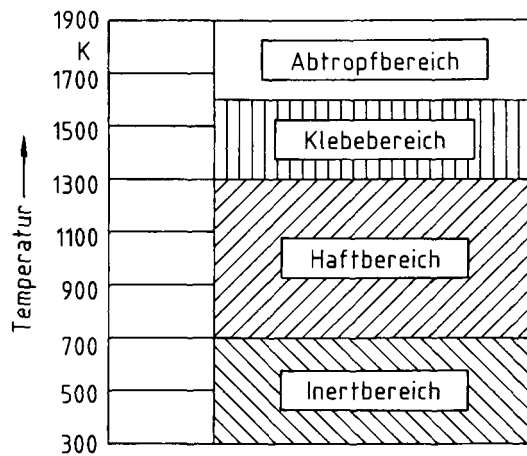


Abb. 4

Flugaschezustände in verschiedenen Temperaturbereichen [6]

Um die Einsatzmöglichkeiten dieser Abscheider beurteilen zu können, muß man sich die Flugaschezustände in verschiedenen Temperaturbereichen vergegenwärtigen. Abb. 4 zeigt als erste Orientierung den Temperatureinfluß auf das Austragsverhalten der abzuschheidenden Partikel. Bis zu Temperaturen von 700 K liegen die Feststoffe üblicherweise in fester Form vor und machen bei der Abscheidung und beim Austrag keine Probleme. Daran schließt sich ein Haftbereich an, der in den Bereich klebender Partikel übergeht, wenn die Feststoffe aufgrund der Temperatur plastisch werden. Der Übergang Inert- zum Haftbereich und vom Haft- zum Klebebereich kann sich je nach Aschezusammensetzung zu höheren Temperaturen verschieben. Ab 1100 K muß aber immer mit Austragsproblemen gerechnet werden. Erst bei Temperaturen um 1600 K liegt die Asche als hochviskose Schmelze vor, die zumindest tropffähig ist. Faßt man dieses Ergebnis zusammen, so ergeben sich die in Tab. 3 skizzierten Einsatzmöglichkeiten für die unterschiedlichen Abscheider. Ein Blick auf die Tabelle zeigt, daß der Zyklonabscheider derzeit das höchste Entwicklungspotential hat. Im folgenden wird deshalb nur die Heißgasentstaubung mit Zyklonabscheidern besprochen.

Temperatur	Zyklonabscheider	Naßabscheider	Filter	Elektrofilter
bis 1100 K feste Partikel, teilweise haftend	einsetzbar	einsetzbar, Wahl einer geeigneten Waschflüssigkeit	einsetzbar, keramische Filterelemente	einsetzbar
1100–1600 K klebrige Partikel, teilweise noch haftend	nicht einsetzbar, Ascheaustrag kaum möglich	nicht einsetzbar, geeignete Waschflüssigkeit nicht bekannt	nicht einsetzbar, Ascheaustrag kaum möglich	nicht einsetzbar, Ascheaustrag kaum möglich
über 1600 K Tropfen	einsetzbar, Verbesserung des Flüssigascheaustrags	nicht einsetzbar, geeignete Waschflüssigkeit nicht bekannt	nicht einsetzbar, geeignete Filterelemente nicht verfügbar	Kenntnisstand ungenügend. Elektrische Prozesse unbekannt

Tab. 3: Apparate zur Heißgasentstaubung [7]

### Zyklonabscheider

Zyklonabscheider sind einfache Apparate, in denen eine Rotationsströmung erzeugt wird, die zur Abscheidung der Partikel genutzt wird. In einem zylindrischen Apparat, der meist mit einem konischen Unterteil versehen wird, wird die Drallströmung entweder durch einen tangentialen Eintritt des feststoffbeladenen Gases erzeugt oder durch im

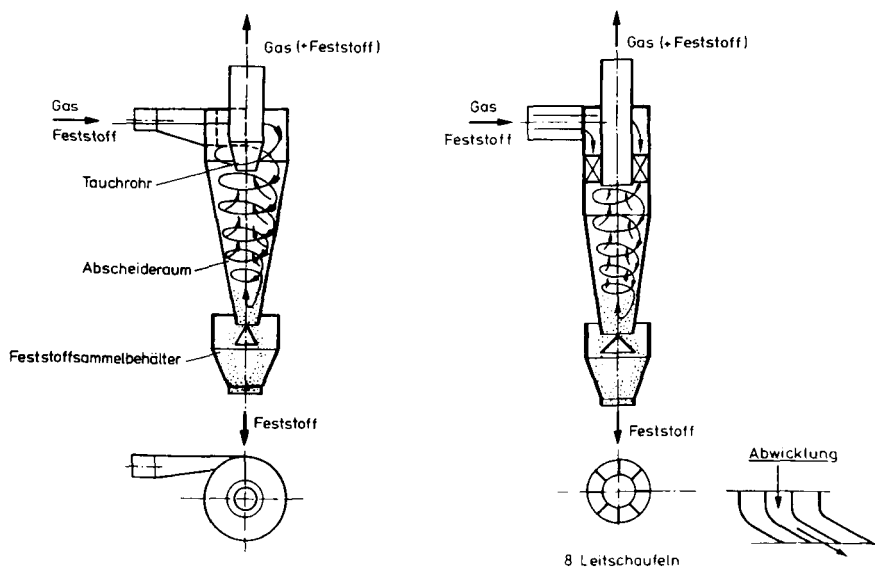


Abb. 5

Bauformen von Zyklonabscheidern

Links: Tangentialzyklon Rechts: Axialzyklon

Oberteil angebrachte Leitschaufeln. Dann spricht man von einem Axialzyklon (vergl. Abb. 5). In dieser Drallströmung wirken auf die Partikel Zentrifugalkräfte, die versuchen, die Feststoffpartikel nach außen an die Zyklonwand zu transportieren, wo sie abgeschieden werden. Da das gesamte Gas durch ein zentral angeordnetes Tauchrohr nach oben abströmt, versucht die nach innen gerichtete Gasströmung Feststoffpartikel mitzuschleppen. Von dem Kräftegleichgewicht zwischen der nach außen gerichteten Zentrifugalkraft und der nach innen gerichteten Widerstandskraft auf die Partikel hängt es ab, welche Partikelgröße abgeschieden und welche durchgelassen wird.

Wirbelströmungen, wie sie in Zyklonabscheidern auftreten, sind uns allen aus der Natur bekannt. Die optisch wirkungsvollsten, in ihren Auswirkungen jedoch meist verheerenden Wirbelströmungen, stellen die Hurrikane dar. Abb. 6 zeigt die Satellitenaufnahme einer Wolkenformation, die sehr schön eine Wirbelströmung veranschaulicht.

Ohne ins Detail gehen zu können, muß darauf hingewiesen werden, daß die im Zyklonabscheider auftretende Umfangsgeschwindigkeit für das Abscheideergebnis maßgeblich ist. Im Außenraum eines Zyklonabscheiders verhält sich diese Strömung nahezu wie ein Potentialwirbel, im Innern, das in etwa durch den Tauchrohrdurchmesser begrenzt wird, wie ein Starrkörperwirbel. Der in Abb. 7 skizzierte Verlauf der Umfangsgeschwindigkeit zeigt, daß die höchste Umfangsgeschwindigkeit  $u_t$  auf dem Tauchrohr-radius  $r_t$  auftritt. Feststoffpartikel, die sich mit der Umfangsgeschwindigkeit  $u_t$  auf diesem Tauchrohr-radius  $r_t$  bewegen, unterliegen also der größten Zentrifugalbeschleunigung



Abb. 6

*Satellitenaufnahme einer Wolkenformation, die eine Wirbelströmung veranschaulicht.*

$\frac{u_i^2}{r_i}$ . Über das Kräftegleichgewicht zwischen Zentrifugalkraft und Widerstandskraft läßt sich nun leicht der Partikeldurchmesser berechnen, bei dem diese beiden Kräfte auf dem Tauchrohrradius, also bei der höchsten Zentrifugalbeschleunigung, im Gleichgewicht stehen [8]. Die geometrischen Abmessungen des Zyklonabscheiders und die Geschwindigkeiten können Abb. 8 entnommen werden.

Mit der Zentrifugalkraft

$$Z = \frac{\pi}{6} d_p^3 (\rho_p - \rho) \frac{u_i^2}{r_i} \quad (1)$$

und der Widerstandskraft

$$W = 3\pi d_p \eta w_{ri} \quad (2)$$

folgt unter Beachtung der Radialgeschwindigkeit

$$w_{ri} = \frac{\dot{M}}{\rho} \cdot \frac{1}{2\pi r_i h} \quad (3)$$

für den Durchmesser der Partikel

$$d_p = 9 \frac{\eta}{(\rho_p - \rho)} \frac{\dot{M}}{\pi h u_i^2} \quad (4)$$



- a) Theorie:  $u \cdot r = \text{konst.}$   
 b) tatsächlicher Verlauf

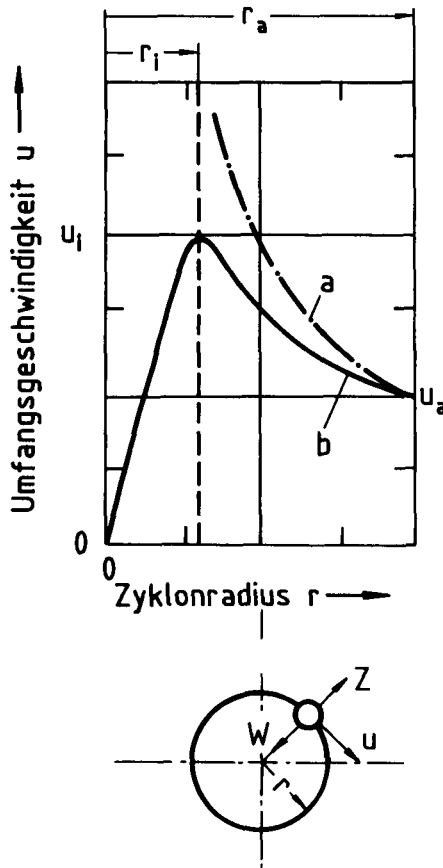


Abb. 7

*Verlauf der Umfangsgeschwindigkeit  
im Zyklon und Kräftegleichgewicht  
an einer Partikel*

Partikel mit diesem Durchmesser können also weder nach außen wandern noch nach innen mitgenommen werden. Der Durchmesser dieser Partikel wird Grenzpartikeldurchmesser  $d_p^*$  genannt.

Zur Charakterisierung des Grenzpartikeldurchmessers kann man den sogenannten Fraktionsabscheidegrad benutzen. Der Fraktionsabscheidegrad gibt an, wie viele Partikel einer ganz bestimmten Partikelgröße, in einem Zyklonabscheider abgeschieden werden können. In dem besprochenen Idealfall bedeutet dies, daß alle Partikel, die einen

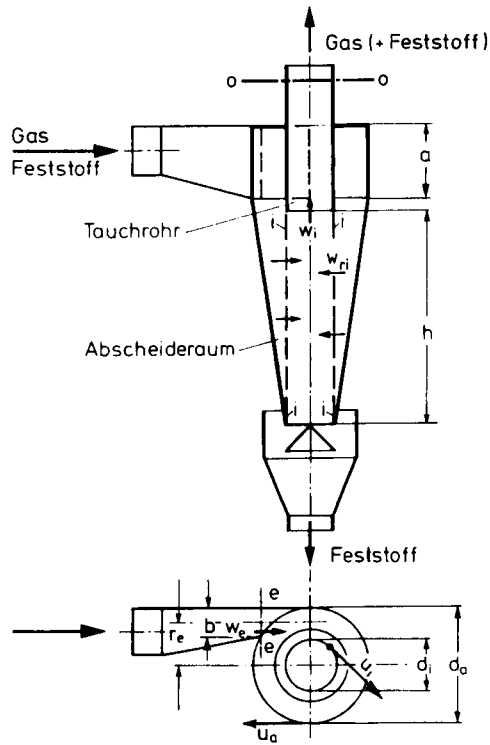


Abb. 8  
Hauptabmessungen des Zyklonabscheiders

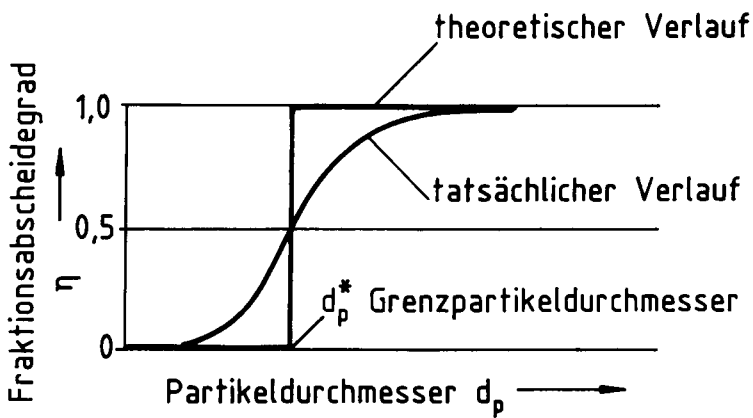


Abb. 9  
Fraktionsabscheidegradkurve

kleineren Durchmesser als den Grenzpartikeldurchmesser  $d_p^*$  haben nicht abgeschieden werden und alle, die größer sind völlig abgeschieden werden. Da im Zyklon jedoch eine hochturbulente Strömung herrscht, wird sich dieser Fall in Wirklichkeit nicht einstellen, sondern es ergibt sich eine S-förmige Fraktionsabscheidegradkurve, wie sie in Abb. 9 eingezeichnet ist. Zur Auslegung eines Zyklonabscheiders muß der Verlauf der Fraktionsabscheidegradkurve bekannt sein, da diese angibt, welcher Anteil einer bestimmten Partikelgröße abgeschieden werden kann.

## Experimentelle Untersuchungen

Um Aussagen über die Fraktionsabscheidegradkurven von Heißgaszyklonen, die bei unterschiedlichen Bedingungen betrieben werden, zu gewinnen, wurden am Institut für Verfahrens- und Kerntechnik der TU Braunschweig erstmals Fraktionsabscheidegradmessungen bei hohen Temperaturen durchgeführt. Die dazu eingesetzte Versuchsanlage zeigt Abb. 10. Mit einem Kompressor wird der erforderliche Gasstrom erzeugt, der mit Hilfe eines Bürstendosierers mit Feststoff beladen wird. Der feststoffbeladene Gasstrom gelangt in den Zyklonabscheider, in dem die Feststoffe abgeschieden werden. Der Gasstrom wird elektrisch aufgeheizt, wobei Temperaturen bis 1300 K erreicht werden. Die Feststoffdosiereinrichtung und der Zyklonabscheider sind in Druckgefäßen angeordnet, weil die Versuche auch bei Drücken bis zu 16 bar durchgeführt werden. Zur Be-

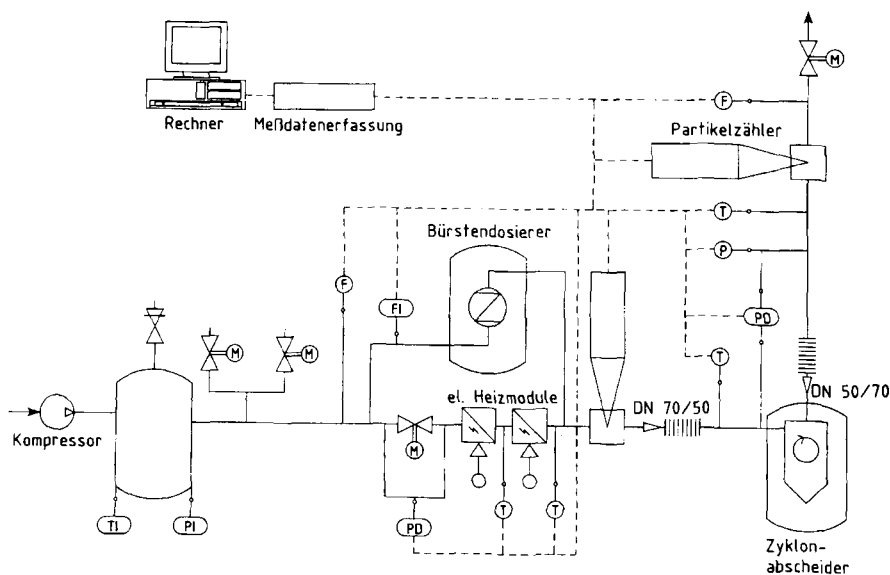


Abb. 10  
Versuchsanlage zur Heißgasentstaubung unter Druck

stimmung des Fraktionsabscheidegrades muß die Feststoffkonzentration und die Partikelgrößenverteilung im Rohgas, d.h. im Eintritt in den Zyklon und im Reingas, also im Austritt des Zyklons, bekannt sein. Da insbesondere die Abscheidung sehr kleiner Partikel mit Partikelgrößen unter  $10\ \mu\text{m}$  von Interesse ist, muß die Feststoffkonzentration und die Partikelgrößenverteilung in-line gemessen werden. Hierzu werden zwei Streulichtmeßgeräte eingesetzt, die derartige Messungen ermöglichen.

## Druckverlust

Neben dem Fraktionsabscheidegrad ist der Druckverlust des Zyklonabscheiders von Bedeutung, da die Energie für die Partikelabscheidung der Strömung entnommen werden muß. Da Druckverlustmessungen sehr viel einfacher durchzuführen sind, als Messungen des Fraktionsabscheidegrades, wurde zunächst überprüft, ob die schon früher entwickelten Berechnungsansätze zur Bestimmung des Druckverlustes [8] auch für hohe Temperaturen Gültigkeit haben. Als ein Beispiel zeigt Abb. 11 gemessene Druckverluste im Vergleich mit berechneten Kurven. Die Abbildung zeigt, daß die Übereinstimmung zwischen Experiment und Theorie sehr gut ist. Um derartige Druckverlustmessungen auch für geänderte Geometrien nutzen zu können, hat sich eine dimensionslose Dar-

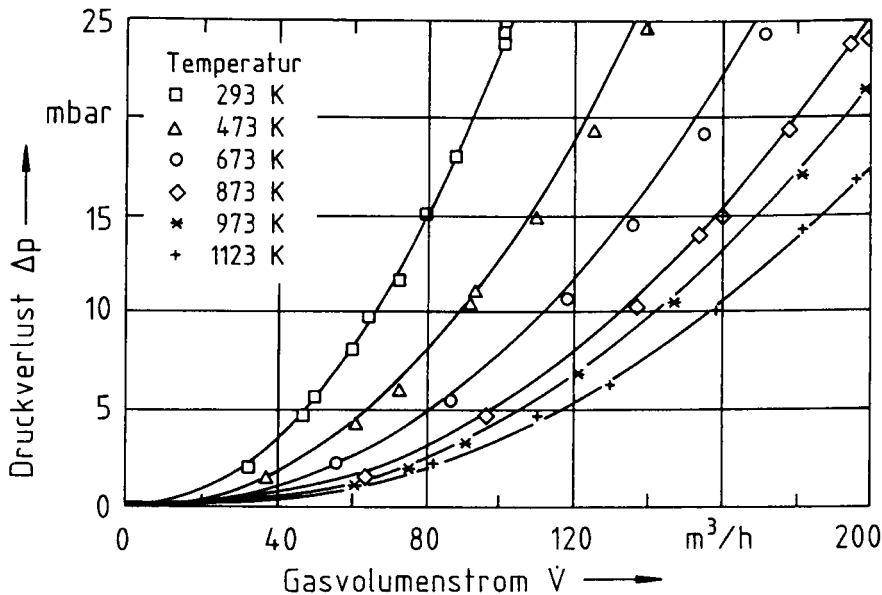


Abb. 11

Gemessene und berechnete Zyklondruckverluste für verschiedene Gastemperaturen

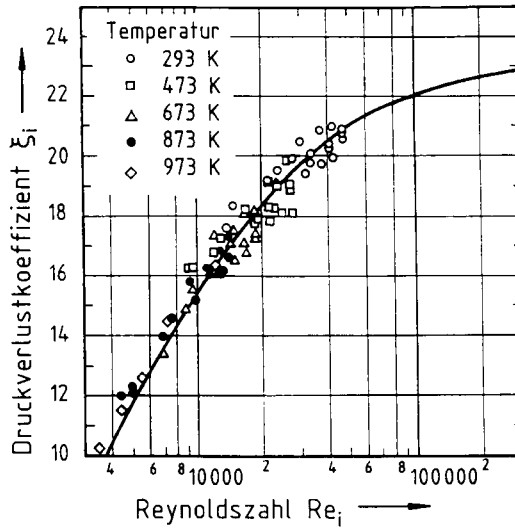


Abb. 12

*Druckverlustkoeffizient in Abhängigkeit von der Reynoldszahl der Tauchrohrströmung*

stellung des Druckverlustes bewährt. Abb. 12 zeigt experimentell bestimmte Druckverlustkoeffizienten in Abhängigkeit von einer auf die Tauchrohrströmung bezogenen Reynoldszahl  $Re_i = \frac{w_i d_i \rho}{\eta}$ . Die eingezeichnete Kurve gibt die berechneten Werte wieder.

Zur Berechnung der Druckverlustkoeffizienten

$$\xi_i = \frac{\Delta p}{\frac{\rho}{2} w_i^2} \quad (5)$$

teilt man den Druckverlustkoeffizienten in 2 Anteile auf

$$\xi_i = \xi_{ic} + \xi_{ii} \quad (6)$$

Hierbei beschreibt

$\xi_{ic}$  den Druckverlust im Eintritt des Zyklons sowie die Reibungsverluste und

$\xi_{ii}$  den Tauchrohrdruckverlust.

Aus einer Drehimpulsbilanz der Gasströmung findet man

$$\xi_{ic} = \frac{r_i}{r_a} \left[ \frac{1}{\left( 1 - \frac{u_i}{w_i} \frac{h}{r_i} \frac{1}{\lambda} \right)^2} - 1 \right] \left( \frac{u_i}{w_i} \right)^2 \quad (7)$$

$$\xi_{ii} = 0,8 \left[ 3 \left( \frac{u_i}{w_i} \right)^{4/3} + \left( \frac{u_i}{w_i} \right)^2 + 2 \right] \quad (8)$$

mit dem Wandreibungskoeffizienten

$$\lambda = 0,0049 + \frac{0,87}{Re_z} \quad (9)$$

und der Reynoldszahl

$$Re_z = \frac{w_i r_i \rho}{\eta} \left[ \frac{r_i/h}{r_a/r_i - 1} \right] \quad (10)$$

Zur Berechnung der Druckverlustkoeffizienten muß die Umfangsgeschwindigkeit  $u_i$  bekannt sein, die ebenfalls aus der Drehimpulsbilanz berechnet werden kann.

$$\frac{u_i}{w_i} = \frac{l}{\frac{F_c}{F_i} \cdot \frac{\alpha}{r_c/r_i} + \lambda \frac{h}{r_i}} \quad (11)$$

### Fraktionsabscheidegrad

Zur Berechnung des Fraktionsabscheidegrades wurde ein Verfahren entwickelt, das nachfolgend in seinen Grundzügen erläutert werden soll [9]. Abb. 13 zeigt die vereinfachte Zyklongeometrie zur Berechnung des Fraktionsabscheidegrades. Hierzu wird der Zyklon in verschiedene Bereiche eingeteilt. Beim Eintritt der Gas-/Feststoffströmung in den Zyklon sind zunächst zwei Bereiche zu unterscheiden. Aufgrund des hohen Druckgefälles vom Außenradius zur Mitte des Zyklons hin, bildet sich am Deckel eine Grenzschichtströmung aus, die Feststoffpartikel, die mit der Gasströmung eintreten, in Richtung auf die Tauchrohraußenseite transportiert. Diese Grenzschicht strömt am Tauchrohraußenmantel nach unten und tritt direkt in das Tauchrohr ein. Die Partikel, die mit dieser Grenzschichtströmung transportiert werden, haben also keine Chance, im Zyklon abgeschieden zu werden. Diesem Bereich 1 der Grenzschichtströmung schließt sich der Einlaufbereich 2 an, der Bereich der Abwärtsströmung ist mit 3 gekennzeichnet. Im Bereich 4, in der Nähe des Staubaustrages, kann eine Wiederaufwirbelung bereits abgeschiedener Partikel erfolgen, die dann im Bereich 5 der aufwärts gerichteten Strömung direkt ins Tauchrohr transportiert werden. Der Zyklon wird nun in axialer Richtung in infinitesimal kleine Volumenelemente aufgeteilt und für jedes Volumenelement und für jede Partikelgröße die Veränderung der Partikelkonzentration innerhalb dieses Volumenelementes berechnet. Dies sei an einem Beispiel erläutert. Im Bereich 3 wirken auf die Partikel die Zentrifugalkräfte, die versuchen, die Partikel nach außen an die Wand zu schleudern. Nach innen in den Bereich 5 der aufwärts gerichteten Strömung werden aber auch Partikel mitgenommen, die aufgrund des Strömungswiderstandes mit dem Gas nach innen transportiert werden. Darüber hinaus gibt es auch noch einen Partikel aus-

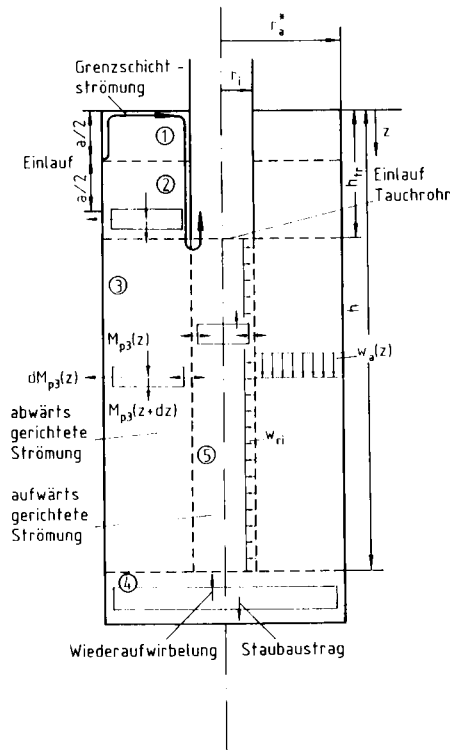


Abb. 13  
Vereinfachte Zyklongeometrie zur Berechnung des Abscheidegrades

tausch zwischen den Bereichen 3 und 5 aufgrund der turbulenten Strömung. Berechnet man nun für eine bestimmte Partikelgröße die Partikelbilanzen und vergleicht die Feststoffkonzentration im Eintritt des Zyklons mit der Feststoffkonzentration im Eintritt des Tauchrohres, so erhält man einen Punkt der Fraktionsabscheidegradkurve. Diese Berechnung ist nun für alle Partikelgrößen durchzuführen, um den vollständigen Verlauf der Fraktionsabscheidegradkurve zu gewinnen. In Abb. 14 sind beispielhaft experimentell bestimmte Fraktionsabscheidegrade mit berechneten Fraktionsabscheidegradkurven verglichen. Die Abbildung zeigt, daß die Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung ausgezeichnet ist.

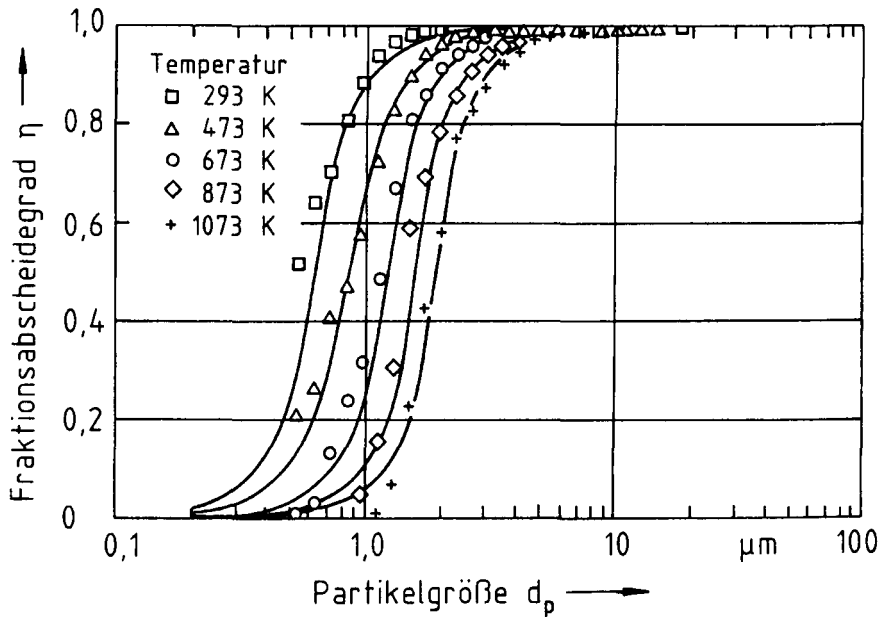


Abb. 14

Gemessene und berechnete Fraktionsabscheidegrade für verschiedene Temperaturen

### Zusammenfassung

Der derzeitige Stand der Erkenntnisse läßt sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Berechnung des Fraktionsabscheidegrades und des Druckverlustes ist für Gas-temperaturen bis 1300 K mit guter Genauigkeit möglich. Es ergeben sich kaum Probleme beim Feststoffaustrag.
- Für den Temperaturbereich 1300–1600 K bereitet die Abscheidung kein Problem. Es ist aber keine technische Lösung für den Feststoffaustrag in Sicht.
- Die Berechnung des Fraktionsabscheidegrades und des Druckverlustes für Temperaturen über 1600 K erscheint möglich. Der Austrag der Flüssigasche aus Zyklonabscheidern ist jedoch noch nicht gelöst. Hier fehlt es vor allem an Kenntnissen über die Filmströmung hochviskoser Schmelzen an der Zyklonwand.

### Schrifttum

- [1] A. Lezno, K. Riedle, E. Wittechow: Entwicklungstendenzen steinkohlebefuerter Kraftwerke. Brennst.-Wärme-Kraft. 41 (1989) 13–22.
- [2] Programmreport Kohletechnik, Bundesminister für Forschung und Technologie, Bonn 1990.
- [3] H. Leibold, R. Mai: HTHD-Staubabscheidung bei fortgeschrittenen Kohleverstromungstechniken, KfK 4931, Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe 1991.



- [4] D. Pavone: Abscheidung von flüssigen Aschepartikeln aus Rauchgasen mit Hilfe von Zentrifugalabscheidern, Fortschr.-Ber. VDI, Reihe 3, Nr. 289, Düsseldorf 1992.
- [5] O.J. Tassiker: High Temperature High Pressure Electrostatic Precipitator for Electric Power Generation Technologies, An Overview of the Status, IChemE Symposium Series, Nr. 99, Gas Cleaning at High Temperatures, University of Surry (1986) 331- 349.
- [6] P. Käferstein, D. Köster, A. Hondl: Heißgasreinigung unter den Bedingungen klebend wirkender Aschestäube, GVC-Fachauschlußsitzung „Energieverfahrenstechnik“, 25. Februar 1994, Würzburg.
- [7] E. Weber, K. Hübner, D. Pavone, R. Schulz, H. Wiggers: Entwicklungsergebnisse bei der Druckkohlenstaubfeuerung, VGB-Konferenz Forschung in der Kraftwerkstechnik, 24./25. Februar 1993, Supplementband.
- [8] M. Bohnet: Optimalauslegung von Aerozyklonen, Chem.-Ing. Techn. 56 (1984) 416-417.
- [9] T. Lorenz: Einfluß der Gastemperatur auf Trenngrad und Druckverlust von Zyklonen, Dissertation, TU Braunschweig, 1993.

## Symbolverzeichnis

a	[m]	Eintrittshöhe
b	[m]	Eintrittsbreite
d <sub>a</sub>	[m]	Zyklonaußendurchmesser
d <sub>i</sub>	[m]	Tauchrohrdurchmesser
d <sub>p</sub>	[m]	Partikeldurchmesser
h	[m]	Zyklonhöhe
u <sub>i</sub>	[m/s]	Umfangsgeschwindigkeit auf dem Tauchrohrradius
w <sub>i</sub>	[m/s]	Tauchrohrgeschwindigkeit
w <sub>ri</sub>	[m/s]	Radialgeschwindigkeit
Δp	[N/m <sup>2</sup> ]	Druckverlust
r <sub>a</sub>	[m]	Zyklonradius
r <sub>e</sub>	[m]	Einlaufradius
r <sub>i</sub>	[m]	Tauchrohrradius
F <sub>e</sub>	[m <sup>2</sup> ]	Eintrittsquerschnitt
F <sub>i</sub>	[m <sup>2</sup> ]	Tauchrohrquerschnitt
Ṁ	[kg/s]	Gasmassenstrom
T	[K]	Temperatur
α	[-]	Kontraktionskoeffizient der Eintrittsströmung
ρ	[kg/m <sup>3</sup> ]	Gasdichte
ρ <sub>p</sub>	[kg/m <sup>3</sup> ]	Feststoffdichte
η	[kg/m · s]	dynamische Viskosität
ξ <sub>i</sub>	[-]	Druckverlustkoeffizient
η	[-]	Fraktionsabscheidegrad
λ	[-]	Wandreibungskoeffizient

---

Prof. Dr.-Ing. Matthias Bohnet  
 Institut für Verfahrens- und Kerntechnik  
 Technische Universität Braunschweig  
 Langer Kamp 7 · 38106 Braunschweig